

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02851

研究課題名(和文) レーザー3D形状解析によるソーティングシステムの高度化

研究課題名(英文) Development of the sorting system using laser 3D shape measurement technique

研究代表者

古屋仲 茂樹 (KOYANAKA, Shigeki)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・研究グループ長

研究者番号：60357035

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：研究代表者らが開発した「レーザー3次元解析法によるソーティングシステム」(ARENNAソータ)の大量処理能力を飛躍的に向上させることを目的として、「ベイズ統計理論」を応用した識別アルゴリズムを新たに検討した。また、識別演算に用いる特徴量変数の拡張を図ることで、重量値の測定を不要とし、かつ複数試料の並列処理が可能な識別アルゴリズムを新たに開発してARENNAソータに実装した。最終的に、開発した識別アルゴリズムを、廃車リサイクル施設における鉄破砕スクラップ及びアルミ破砕スクラップの自動ソーティングに適用して、その効果を確認した。

研究成果の概要(英文)：In order to largely improve processing capacity per time of the ARENNA (Appearance Recognition with Neural Network Analysis) sorter, an identification algorithm using Bayes' theorem was discussed. By increasing the number of scrap features recognized by the 3D shape measurement system of the ARENNA sorter, an identification algorithm that can process multiple scraps at the same time without weight measurement were developed. Finally, processing ability of the new ARENNA sorter was confirmed in ELV recycling facility.

研究分野：資源リサイクル工学

キーワード：廃棄物再資源化 環境技術 分離精製 輸送機器

1. 研究開始当初の背景

近年の情報技術の進化を背景として、資源リサイクル分野では、都市鉱山の戦略的な開発を目指し、各種スクラップに含まれる重要元素の種類や量などをデータベース化することにより、物理選別プロセスの緻密化、高効率化を目指す試みが始まっている。

物理選別プロセスを IT 化して大容量データを活用するには、選別装置の操作条件や選別成績に係るデータ収集・解析の自動化が必須となるが、「ソーティング」はこうした点で非常に適した選別技術と言える。研究代表者らはこれまでに、重量値とレーザー3D形状計測（光切断法）によって得られる7種の測定値（体積、面積等）からなる変数を用いた演算処理（ニューラルネットワーク）によって物体の種別を識別する、「レーザー3次元解析法によるソーティングシステム」（Appearance Recognition with Neural Network Analysis sorter (ARENNA sorter)）を独自に開発し、展伸アルミ、鋳造アルミ、マグネシウムからなる破砕スクラップの選別を90%以上の精度で達成できることを明らかにしている。このソーティング技術は、予め代表試料を使って識別用データベース・アルゴリズムを設定後、未知試料を供給して選別する方式であり、一度識別に失敗した試料でも種別を修正（教師データを入力）してデータベースに追加後、ニューラルネットワークを再学習させると識別が可能になるという長所がある。他方、こうした識別方法は、あくまで過去に取得したデータの参照とその学習に基づく演算方式であるために大量処理への適用性には懸念が残っている。

2. 研究の目的

本研究では、レーザー3次元解析法によるソーティングシステムの大量処理能力を飛躍的に向上させるために以下の検討を行う。「ベイズ統計理論」を応用した識別アルゴリズムを新たに開発し、アルミ・鉄スクラップの合金種選別へ適用する。識別演算に用いる変数を拡張することで重量測定を必要とせず、複数試料の並列処理が可能な識別アルゴリズムを開発する。本ソーティングシステムのデータベース・ニューラルネットワークを使用者が教師データを入力することなく自動更新・遠隔管理する技術を開発する。

3. 研究の方法

(1) 試料及びデータベース構築

研究協力企業から下記のサンプル提供を受けた。

（鉄破砕スクラップ）廃車の破砕・選別処理において磁力選別で回収された鉄スクラップから、破砕片約 1000 個を無作為にサンプリングし、XRF 分析により A: 「圧延鋼板」（ボディ周りの炭素鋼が多い、Mn, Cr 等添加元素含有率小）と B: 「非圧延鋼板」（駆動系等の特殊鋼が多い、Mn, Cr 等添加元素含有率大）にグループ分けした試料。図 1 に鉄破砕スクラップの写真を示す。

（アルミ破砕スクラップ）廃車の破砕・選別処理において渦電流選別で回収されたアルミスクラップから、破砕片約 1000 個を無作為にサンプリングし、XRF 分析により A: 「展伸材」（6063 合金）と B: 「鋳造材」（鋳造材アルミ、他の展伸材、垂鉛等）にグループ分けした試料。

データベース構築にあたっては、代表者が所有するソーティングシステムの制御プログラムを破砕片の周囲長と表面凹凸度を測定できるように改造し、各試料の約 7 割の破砕片を使って 9 種類の測定データ ($D_1 \sim D_9$) と成分を記録した。

D_1 : W (重量) [g]、 D_2 : V (体積) [mm^3]、 D_3 : S (面積) [mm^2]、 D_4 : L1 (縦長) [mm]、 D_5 : L2 (横長) [mm]、 D_6 : MH (最大高) [mm]、 D_7 : OH (重心点高) [mm]、 D_8 : E1 (表面凹凸度指数 (ベルト幅方向)) [-]、 D_9 : E2 (表面凹凸度指数 (ベルト移動方向))



成分 A (圧延鋼板)



成分 B (非圧延鋼板)

図 1 実験試料とした鉄破砕スクラップ

(2) 実験装置及び方法

従来、製品等の自動選別技術としては、透過 X 線や蛍光 X 線を活用したソーティング技

術が有力視されているが、機器自体が高価、塗装・汚れ等の影響を受け易い等の問題がある。代表者が開発したレーザー3次元解析法による物体の識別分離技術は、1台のレーザー3次元計測器によって得られる立体形状に関する情報を、ニューラルネットワークを用いた独自の演算処理プログラムによって解析し、その結果に基づいて物体の種別を自動的に識別し分離する手法である。使用する計測器は線状のレーザー光で測定対象物を上方から走査して三角測距の原理で表面形状を測定するもので、物体の体積、投影面積、高さ、定方向径など独自に設定した複数の情報を数値データとして瞬時に取得可能である。本技術によれば、従来技術と比較して圧倒的に安価な装置構成が可能であり、バルクの特性の基づいた分離法であるため、表面の塗装や汚れの影響を受けないといった特長を有する。

4. 研究成果

(1) ベイズフィルタによる識別アルゴリズムの開発

本研究では「前の確率（事前確率）にデータを取り込んで新たな確率（事後確率）を算出する」といったベイズ統計理論の計算フローに基づいたスクラップの識別方法を検討した。このような識別方法は、Web系システムにおいて特定の単語が文書中に出現する確率を用いて「迷惑メール」と「通常メール」を識別する方法（ベイズフィルタ）として利用されている。本スクラップの識別法の基本的な考え方は以下の通りである。

成分Aと成分Bの存在割合を事前確率として設定

蓄積した測定データに対して各成分の頻度分布を特徴量データ種類別に算出
頻度分布の横軸に閾値を設定してそれより大となる確率を測定データの種類ごとに設定

未知試料に対して で設定した事前確率に で設定した確率を逐次適用してA、Bの存在割合（事後確率）を修正
最終的に事後確率が大きくなる成分を識別結果として出力する

実験では、上述の9種類の測定データに以下の8種類のデータ ($D_{10} \sim D_{17}$) を追加して、17種類のデータごとに、成分AとBの頻度分布に閾値（両成分間の頻度累積値の差が最大となる値）を設定し、閾値より大きな値を取る確率を算出した。ある試料について得られる17種の測定値をそれぞれ閾値と比較し、その測定値が出現する確率を記録、17種すべての測定値についての出現確率と事前確率

(A, Bの存在比)の積を計算し、その値が大となる成分を識別結果として判断した。

$$D_{10}: E1/L1, D_{11}: E1/S, D_{12}: E2/L2, D_{13}: E2/S, D_{14}: V/S, D_{15}: V/(L1 \cdot L2), D_{16}: S/(L1 \cdot L2), D_{17}: L1/L2$$

鉄破砕片(2343個)について各9回測定したデータ(総データ数21097個)を用意し、上述のベイズフィルタの考え方に基づいて各データの種別を判定した。表1に全17種類の特徴量変数を用いて種別判定を行った際の結果を示す。成分Aの破砕片の測定データ9821個のうち約76%が正しく判定された。また、成分Bの破砕片の測定データ11276個のうち約84%が正しく判定され、トータルでは約80%の正解率となった。研究代表者らのニューラルネットワークによる識別方法では、これらと同数の測定データをより高い正解率で学習させるが可能であり、未知の破砕片を実際に選別すると、成分A、Bともに84~87%の正解率を示す。本研究で検討したベイズフィルタ法はニューラルネットワーク法に比較して識別精度の点で明らかに劣ることからソーティング装置の開発は困難と考えられた。

表1 ベイズフィルタによる鉄破砕スクラップ識別結果(特徴量17種)

	試験サンプル数	正解数	正解率 [%]
A	9821	7453	75.8
B	11276	9464	83.9
Total	21097	16917	80.2

(2) 重量値不要・並列処理システムの開発

図2に、本研究において開発したレーザー3次元識別システム(重量値不要・並列処理タイプ。ARENNAソータ3号機)の写真を示す。これまで識別計算に必要としていた重量値を計測しないシステムとなっている。また、面積、縦長、横長、最大高、重心点高、周囲長といった選別対象物の特徴量の測定において、x-y平面(コンベヤベルト面)への投影図だけでなく、x-z平面及びy-z平面への投影図に基づく数値を計算可能となるようにプログラムを改造した。これにより、特徴量の独立な変数を従来の9種類から17種類へ拡大した。また、ベルトコンベヤ幅300mmの全域をカバーした計測が可能となるように撮影光学系を改良するとともに、一回の撮影で6個以上の検体を同時に認識、6ch電磁式パドルによって高速選別可能な重量値不要・並列処理システムを開発した。

上記の 17 種の特徴量変数を用いた識別アルゴリズムによって、「鉄破碎スクラップ」中に含まれる「圧延鋼板」と「非圧延鋼板」を精度 87%で識別可能なこと、また「アルミ破碎スクラップ」に含まれる「展伸材」と「鋳造材」を精度 82%で識別可能なことを実験室内の検討で確認した。

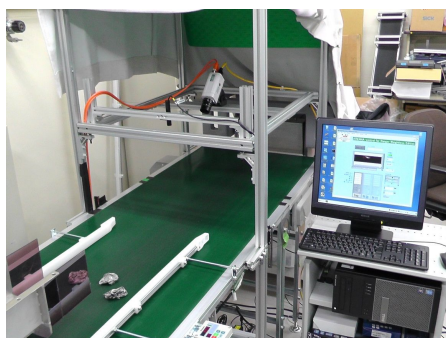


図2 レーザー3次元識別システム
(重量値不要・並列処理タイプ)

(3) データベース自動更新・遠隔管理技術の開発

前述の通り、ベイズフィルタによる識別精度が当初予想したほど上昇せず、ベイズ法とニューラルネットワーク法の組み合わせる識別アルゴリズムの有効性は確認できなかった。このため、当初計画していたベイズフィルタの出力をニューラルネットワークの更新に利用する「自立型学習演算プログラム」の開発には至らなかった。一方、「遠隔型データ管理システム」については、「Windows リモート」を基礎として開発の見通しを得た。

(4) リサイクル現場での総合試験

最終年度に研究協力企業のリサイクルセンターにて総合試験を実施し、本研究で開発した識別プログラムを同社のソーティングシステムに移植して動作検証を試みた。その結果、アルミ破碎スクラップを「展伸材」と「非展伸材」にソーティングした際に「展伸材」と識別した破碎片混合物の平均組成が6000系アルミ合金のJIS基準値を満足することをハンドヘルド型蛍光エックス線分析装置により確認した。また、鉄破碎スクラップを「圧延鋼板」と「非圧延鋼板」にソーティングして、「圧延鋼板」と識別した破碎片の平均組成が、Mn:0.6wt%以下、Cr:0.03wt%以下、Cu:0.06wt%以下となることを確認した。これらのソーティング時の処理速度については、アルミ、鉄の何れについても本研究の開発目標である15,000個/時、ベルト速度2m/sを実現可能であることを確認した。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計8件)

古屋仲茂樹、Automatic sorting of small electronic device scraps for rare metal recycling, EcoDesign 2015, 2015年12月、東京、東京国際フォーラム
張田真、大和田秀二、古屋仲茂樹、加藤由章、高杉篤美、葛谷幹夫、Mutual separation of aluminum alloys by combining appearance recognition with neural network analysis (ARENNA) and laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) sorters, Sensor Based Sorting & Control 2016, 2016年2月、アーヘン工科大学、アーヘン、ドイツ
古屋仲茂樹、産総研におけるソーティング技術開発、資源・素材学会リサイクリング部門委員会講演会、2016年7月、早稲田大学、東京

古屋仲茂樹、ベイズフィルタを用いた金属破碎スクラップの識別に関する一考察、資源・素材2016(盛岡)、2016年9月、岩手大学、盛岡

古屋仲茂樹、ARENNA ソータから情報利用型ソータへ、環境資源工学会第32回シンポジウム、2016年9月、新橋住友ビル、東京

古屋仲茂樹、Automatic sorting of small electronic device scraps for rare metal recycling、第15回資源リサイクルと材料科学に関する日韓シンポジウム、2017年4月、関西大学、大阪

古屋仲茂樹、ARENNA ソータ3号機、NEW環境展2017、2017年5月、東京ビッグサイト、東京

古屋仲茂樹、資源リサイクルのための物理選別技術開発の新展開、JOGMEC/MMIJ 合同シンポジウム、2017年11月

〔その他〕

ホームページ

<https://unit.aist.go.jp/emri/111resp/ja/taisho.pdf>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古屋仲茂樹 (KOAYNAKA, Shigeki)
国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・研究グループ長
研究者番号: 60357035

(2) 連携研究者

芝田隼次 (Shibata, Junji)
関西大学環境都市工学部・教授
研究者番号: 70067742

(3)研究協力者

張田 真 (Harita, Makoto)